



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
(ДГТУ)**

Кафедра «ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПЛАТФОРМЫ В  
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ»

**Учебно-методическое пособие**  
к контрольной работе по дисциплине  
«Теория автоматического управления»

Ростов-на-Дону

2023

УДК 62-83.01 (075.8)

Составитель(и) Каун О.Ю

Учебно-методическое пособие к контрольной работе по дисциплине  
«Теория автоматического управления» / Каун О.Ю. – Ростов-на-Дону:  
Донской государственный технический университет, 2023.

Предназначены для обучающихся по направлению подготовки 13.03.02  
Электроэнергетика и электротехника.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

**Тема:** Использование возможностей MATLAB для решения задач теории автоматического управления.

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы - получение навыков работы с пакетом программ Control System Toolbox системы MATLAB для решения задач теории автоматического регулирования.

### 2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ MATLAB ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ТАУ

#### 2.1. Возможности пакета прикладных программ Control System Toolbox. Основные положения.

При реализации ППП Control System Toolbox использованы принципы объектно-ориентированного программирования. Введен новый класс объектов: линейные системы с постоянными параметрами (*linear time invariant obyests, или lti объекты*). Этот класс включает линейные непрерывные или дискретные, одномерные с одним входом и одним выходом системы и многомерные со многими входами и многими выходами.

**lti – система** может быть представлена тремя подклассами:

- четверкой матриц – при описании динамических свойств через переменные состояния;
- двумя векторами, составленными из коэффициентов числителя и знаменателя – при описании динамических свойств передаточными функциями;
- двумя векторами, составленными из нулей и полюсов передаточной функции и числа, равного обобщенному коэффициенту передачи.

Поскольку при изучении курса «Автоматика» для описания динамических свойств элементов и систем применялись передаточные функции, то в дальнейшем будет описана работа именно с этим подклассом.

В ППП Control System Toolbox этот подкласс обозначается как **tf**.

Возможности пакета позволяют: описывать динамические свойства **lti** объектов в виде передаточных функций; из набора объектов формировать структурную схему; выполнять преобразование структурных схем (последовательное, параллельное соединение блоков, охват обратными связями); выполнять построение переходных и импульсных характеристик, логарифмических амплитудных и фазовых частотных характеристик, АФЧХ для критерия Найквиста; формировать матрицы наблюдаемости и управляемости; осуществлять синтез САР методом корневого годографа, частотных методов и методов оптимального управления. Мы остановимся только на тех возможностях пакета, которые позволяют упростить

исследование САР в рамках курса «Автоматика» по направлению подготовки специалистов «Агроинженерия».

## 2.2. Формирование lti-моделей в виде tf объектов. Операции над lti-моделями

В общем виде передаточная функция записывается так:

$$W(p) = \frac{b_0 p^m + b_1 p^{m+1} + \dots + b_{m-1} p + b_m}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_{n-1} p + a_n}, \quad m \leq n.$$

Как **tf**-объект передаточная функция задается многочленом числителя **num** и многочленом знаменателя **den**. В системе MATLAB многочлены представляются как векторы-строки, составленные из коэффициентов многочлена в порядке убывания степеней переменной.

### Пример 1

Задана передаточная функция звена:

$$W(p) = \frac{3p^2 + 0,5p + 2}{11p^4 + 7p^3 + 8p^2 + 0,7p + 5}.$$

Чтобы записать ее как **tf**-объект, необходимо выполнить последовательность действий:

```
>> num = [3, 0.5, 2];
>> den = [11, 7, 8, 0.7, 5];
>> wp = tf (num, den)
```

Аналогичная процедура может быть выполнена и следующим образом:

```
>> wp = tf ([3, 0.5, 2], [11, 7, 8, 0.7, 5])
```

### Задание 1

Задайте в виде **tf** - объектов передаточные функции следующих звеньев:

$$W_1(p) = K_1 = 2; \quad W_2(p) = \frac{K_2}{p}, \quad K_2 = 0.5;$$

$$W_3(p) = \frac{K_3}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1}, \quad K_3 = 6, \quad T_3^2 = 11, \quad T_4 = 23.$$

В системах автоматики могут присутствовать звенья с запаздыванием, динамические свойства которых описываются передаточной функцией  $W(p) = e^{-\tau p}$ , где  $\tau$  - время запаздывания.

В этом случае передаточная функция записывается совместно с передаточной функцией усилителя с коэффициентом усиления, равным 1, т.е.

$$W(p) = K * e^{-\tau p} = 1 * e^{-\tau p}.$$

### **Пример 2**

Задать в виде **tf**-объекта передаточную функцию звена:

$$W(p) = e^{-50p}.$$

Это выполняется следующей командой:

```
>> wp = tf ([1], 'td', 50)
```

Для передаточной функции

$$W(p) = \frac{3}{0,5p + 1} \cdot e^{-15p}$$

**tf**-объект получим следующим образом:

```
>> wp = tf ([3], [0.5, 1], 'td', 15)
```

### **Задание 2**

Задать в виде **tf**-объекта следующие передаточные функции:

$$W_3(p) = \frac{K_3}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1} \cdot e^{-\tau p}, \quad K_3 = 6, \quad T_3^2 = 11 \text{ с}, \quad T_4 = 23 \text{ с}, \quad \tau = 12 \text{ с};$$

$$W_4(p) = \frac{K_4}{T_5 p + 1}, \quad K_4 = 0.5, \quad T_5 = 7;$$

$$W_5(p) = \frac{K_5}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1}, \quad K_5 = 0.8;$$

$$W_6(p) = K_6 p, \quad K_6 = 0.1.$$

Пакет Control System Toolbox имеет набор функций, позволяющих выполнять операции над передаточными функциями, записанными в виде **tf** объекта. Это функции, позволяющие получать передаточную функцию последовательно и параллельно соединенных звеньев, выполнять конкатенацию звеньев, получать передаточную функцию звеньев с обратными связями.

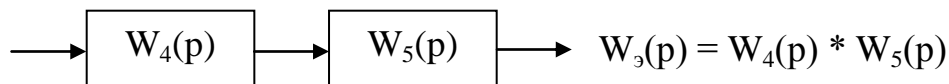
**Последовательное соединение звеньев**

Рисунок 1 - Последовательное соединение звеньев

В MATLAB это действие выполняется аналогично:

```
>> we = w4*w5
```

**Задание 3**

Выполнить преобразование последовательно соединенных звеньев  $W_3(p)$ ,  $W_4(p)$ ,  $W_6(p)$  из задания 2.

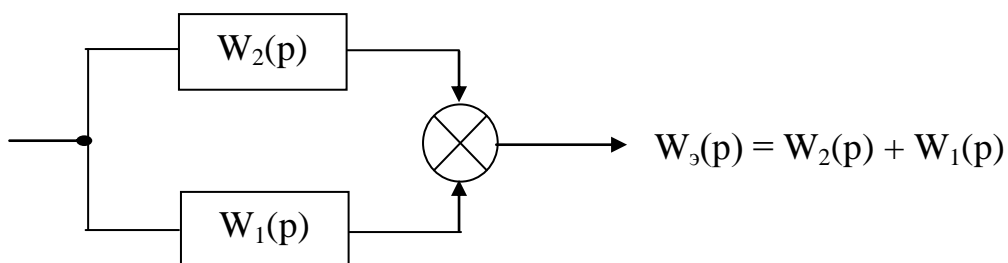
**Параллельное соединение звеньев**

Рисунок 2 - Параллельное соединение звеньев

В MATLAB процедура выполняется аналогично:

```
>> we = w2 + w1
```

**Задание 4**

Выполнить преобразование:

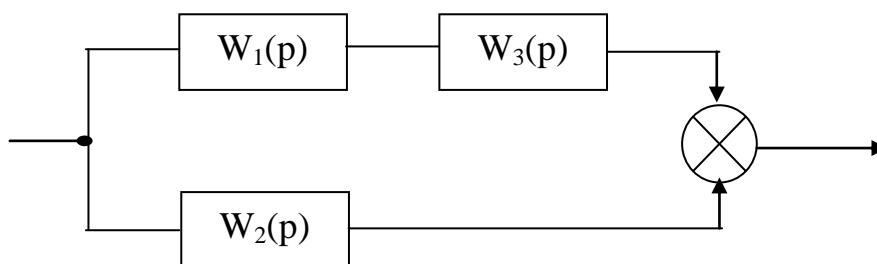
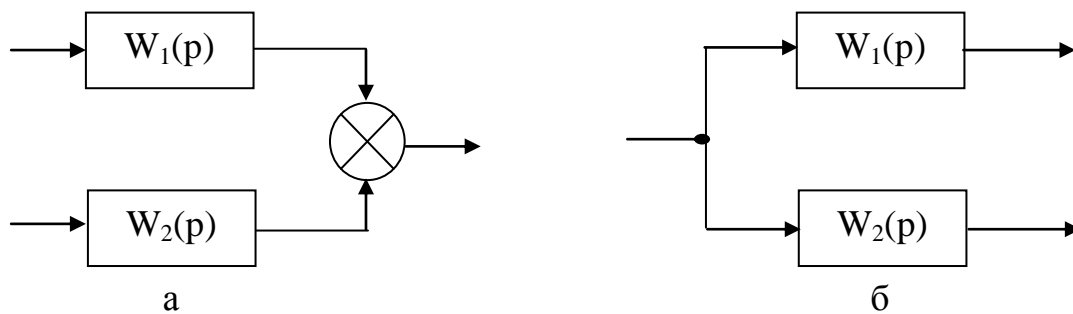


Рисунок 3 - Комбинированное соединение

Передаточные функции взять из задания 1.

**Конкатенация.**

Существуют горизонтальная и вертикальная конкатенации. В терминах моделей входа-выхода эти две операции имеют интерпретацию в виде структурных схем:



а – горизонтальная конкатенация;  
б – вертикальная конкатенация.

Рисунок 4 - Виды конкатенации

Горизонтальная конкатенация выполняется с помощью следующей процедуры:

```
>> we = [w1, w2]
```

Вертикальная конкатенация соответственно при помощи модуляций:

```
>> we = [w1; w2]
```

### Задание 5

5.1. Выполнить горизонтальную конкатенацию для передаточных функций  $W_4(p)$  и  $W_5(p)$  из задания 2.

5.2. Выполнить вертикальную конкатенацию для передаточных функций  $W_4(p)$  и  $W_5(p)$  из задания 2.

### Соединение lti - моделей обратной связью

Для реализации обратной связи используется функция **feedback**.

### Пример 3

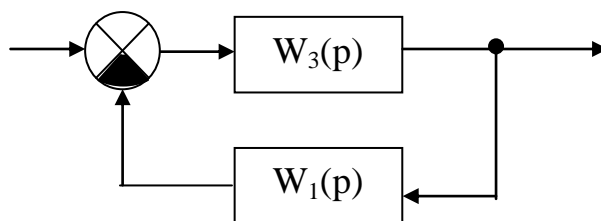


Рисунок 5 - Элемент, охваченный отрицательной обратной связью

В пакете Control System такое соединение реализуется следующей строкой:

```
>> we = feedback (w3, w1)
```

По умолчанию предполагается, что контур замыкается **отрицательной** обратной связью. Для **положительной** обратной связи необходимо использовать обращение вида

```
>> we = feedback (w3, w4, +1)
```

**Задание 6**

Найти эквивалентные передаточные функции следующих схем:

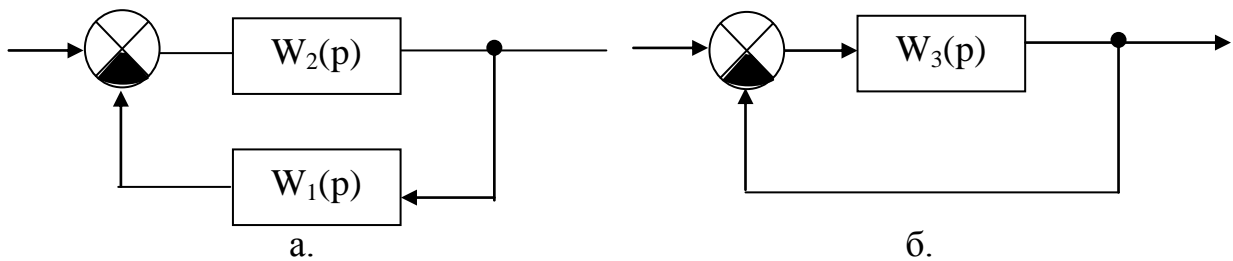


Рисунок 6 - Структурные схемы для задания 6

*Для lti-объектов с запаздыванием входных сигналов разрешено ограниченное количество операций.*

***Допустимы следующие операции:***

- горизонтальная конкатенация;
- сложение lti объектов с одинаковыми запаздываниями по входам;
- умножение lti объектов;
- преобразование непрерывной части в дискретную;
- все операции анализа во временной и частотной областях.

***Построение lti модели на основе структурной схемы***

С помощью приведенных выше функций можно выполнять преобразование структурных схем и в большинстве случаев можно получить передаточную функцию САР. Покажем это на примере.

**Задание 7**

Получить передаточную функцию САР (рисунок 7):

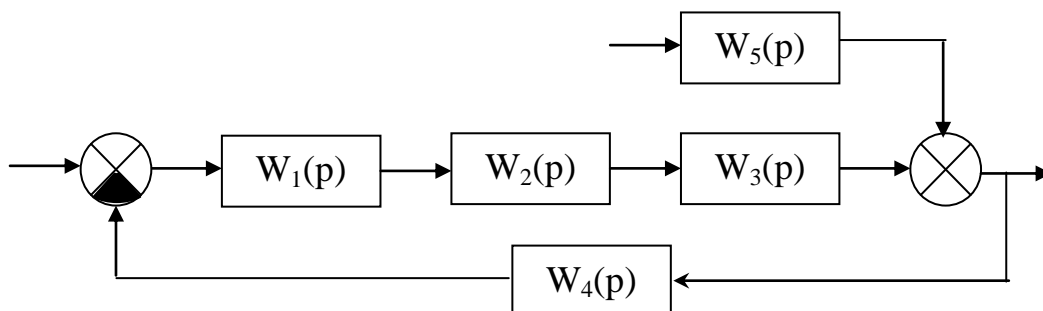


Рисунок 7 - Структурная схема САР для задания 7



$$W_1(p) = 2; \quad W_2(p) = \frac{2}{p}; \quad W_3(p) = \frac{0,5}{11p + 1};$$

$$W_4(p) = 0,11; \quad W_5(p) = \frac{2}{11p + 1}.$$

Для получения передаточной функции по управляющему воздействию выполним преобразования:

$$W_{\Sigma 1}(p) = W_1(p) * W_2(p) * W_3(p).$$

$$>> \text{we1} = \text{w1} * \text{w2} * \text{w3}$$

$$W_{\text{yb}}(p) = \frac{W_{\Sigma 1}(p)}{1 + W_{\Sigma 1}(p) * W_4(p)}.$$

$$>> \text{wuv} = \text{feedback}(\text{we1}, \text{w4})$$

Для получения передаточной функции по возмущающему воздействию необходимо выполнить следующие преобразования:

$$W_{\Sigma 2}(p) = W_1(p) * W_2(p) * W_3(p) * W_4(p).$$

$$>> \text{we2} = \text{w1} * \text{w2} * \text{w3} * \text{w4}$$

$$W_{\text{bv}}(p) = \frac{W_5(p)}{1 + W_{\Sigma 2}(p)}.$$

$$>> \text{wvv} = \text{feedback}(\text{w5}, \text{we2})$$

Если выполнить приведенную последовательность команд для звеньев, в числе которых есть звено с запаздыванием, то система выдает сообщение, что такая операция (охват обратной связью) невозможна. Поэтому построение *lti* - моделей на основе структурных схем, содержащих трансцендентные звенья, осуществляется с использованием функций **connect** и **append**.

#### *Форматы функций*

**sys = append(sys1, sys2, ..., sysN)**

**ysc = connect(sys, Q, inputs, outputs)**

Функция **append** объединяет входы и выходы *lti* - моделей *sys1*, *sys2*, ..., *sysN* и формирует объединенную модель.

#### *Пример 4*

Для последовательного соединения звеньев:

$$W_1(p) = 3; \quad W_2(p) = \frac{0,5}{2p + 1}; \quad W_3(p) = \frac{2e^{-5p}}{3p^2 + 2p + 1}; \quad W_4(p) = 0,5.$$

После представления их в виде tf-моделей, команда будет выглядеть так:

```
>> we = append (w3, w1, w2, w4)
```

*Трансцендентное звено (в данном случае w3) должно указываться **первым** по отношению ко входу системы*

Функция **connect** формирует lti-модель в пространстве состояний с учетом соединений блоков.

Входные аргументы **Q**, **inputs**, **outputs** имеют следующие значения:

**Q** – представляет собой матрицу, в которой описываются связи между блоками системы **sys**.

Каждая строка матрицы соответствует одному входу системы. Первый элемент строки – номер входа, последующие элементы указывают номера блоков (как они заданы функцией **append** для системы **sys**), выходы которых подключены к данному входу. Отрицательные элементы означают суммирование со знаком минус.

**inputs** – вектор, указывающий номера входов системы. Номер входа – номер блока, на вход которого подают внешний сигнал.

**outputs** – вектор, указывающий номера выходов системы. Номер выхода – номер блока, на выходе которого необходимо получить переходную функцию.

*Входов и выходов системы может быть несколько, поэтому аргументы представлены в виде вектора.*

*Так для единой САР можно одновременно получить передаточные функции по управляющему и возмущающему воздействиям.*

### **Задание 8**

Зададим последовательность соединения блоков в структурной схеме САР по схеме из задания 7.

```
>> Q=[1,-4;2,1;3,2;4,3];
```

Знак минус в первой строке матрицы означает, что на вход блока 1 передается отрицательный сигнал с выхода блока 4.

В заданной структуре не указано подключение блока W5(p), т.е. находим только передаточную функцию по каналу управления.

```
>> inp=[1];
```

- подача задающего воздействия (вход) осуществляется на вход блока 1.

```
>> out=[3];
```

- переходную кривую можно получить на выходе блока 3.

```
>> wuz=connect (we, Q, inp, out)
```

В результате получим передаточную функцию САР по каналу управления.

*Сравните ее с видом передаточной функции wuv.*

Чтобы получить передаточную функцию по возмущающему воздействию, добавили усилитель в качестве блока, в котором будут суммироваться сигналы канала управления и канала возмущения:  $W_6(p)=K_6=1$

```
>> w6=tf([1]);
```

### Пример 5

Дана схема (рисунок 8):

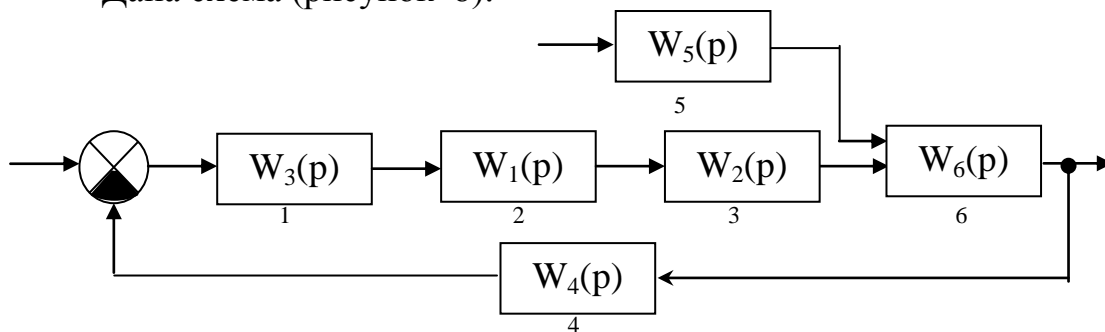


Рисунок 8 - Структурная схема для примера 5

Сформируем объединенную модель:

```
>> OB=append (w3, w1, w2, w4, w5, w6); - w3 с запаздыванием.
```

1 2 3 4 5 6 - блоки схемы

Зададим схему соединения блоков и номера блоков входа и выхода САР:

```
>> SX=[1,-4,0;2,1,0;3,2,0;6,3,5;4,6,0];
```

*В описании схемы номера блоков (номера входов и выходов) соответствуют порядковому номеру в функции **append**. Блок, записанный первым, имеет номер входа и выхода –1.*

*В описании схемы во многих строках последней цифрой стоит 0. Это сделано для того, чтобы размер строк был одинаков для всей матрицы, т.к. к блоку 6 ( $W_6$ ) подключены два блока: 3-й и 5-й.*

Зададим вход и выход системы:

```
>> in2=[5];
```

```
>> out2=[6];
```

Получим передаточную функцию по возмущающему воздействию:  
`>>WVZ=connect(OB,SX,in2,out2)`

*Передаточная функция по возмущающему воздействию не содержит звена с запаздыванием.*

*Следовательно, если в канале управления находится трансцендентное звено, функция connect не позволяет получить такую передаточную функцию САР по возмущающему воздействию.*

### 3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

**3.1.** Получить передаточную функцию разомкнутой и замкнутой САР.

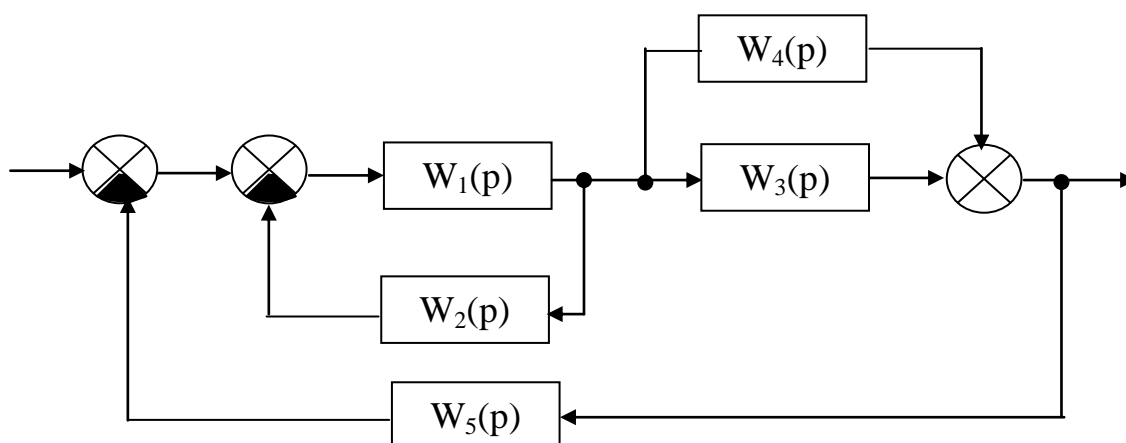


Рисунок 9- Структурная схема САР для задания 3.1.

Вариант Пе- реда- точная функция	1	2	3	4	5	6
$W_1(p)$	2	$\frac{1}{p}$	$\frac{0,5}{5p+1}$	$\frac{1}{p^2+3p+1}$	$0,5p$	$\frac{2}{2p^2+p}$
$W_2(p)$	$\frac{1}{p}$	$\frac{1}{2p^2+p+1}$	3	$2p$	$\frac{2}{p}$	5
$W_3(p)$	$\frac{3}{2p+1}$	$\frac{1}{p}$	$\frac{2}{p}$	$\frac{3}{7p^2+0,1p+1}$	8	$0,5p$
$W_4(p)$	$\frac{2}{3p+1}$	2	$\frac{3}{4p+p}$	$\frac{1}{p}$	$\frac{0,3}{0,1p^2+0,01p+1}$	$\frac{3}{p}$
$W_5(p)$	3	0,2	$\frac{0,1}{2p^2+4p+1}$	0,07	$\frac{3}{4p+1}$	$\frac{1}{2p^2+1}$

**3.2.** Получить передаточную функцию по управляющему и возмущающему воздействию.

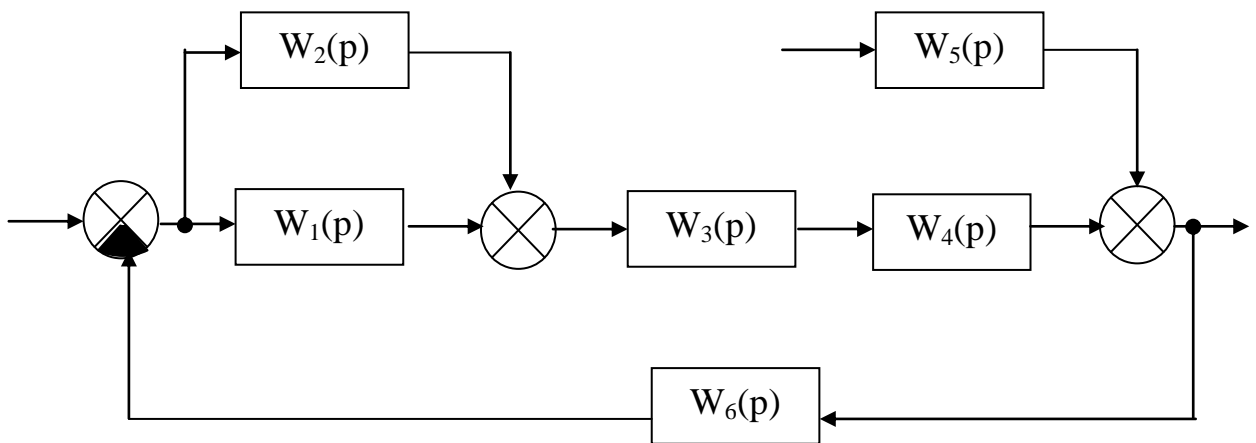


Рисунок 10 - Структурная схема САР для задания 3.2

$$W_1(p) = 0,1; \quad W_2(p) = 0,1p;$$

$$W_3(p) = \frac{2}{p}; \quad W_4(p) = \frac{3}{3p^2 + 0,1p + 1};$$

$$W_5(p) = \frac{1}{3p^2 + 0,1p + 1}; \quad W_6(p) = 0,5.$$

**3.3.** Получить передаточную функцию по каналу управления:

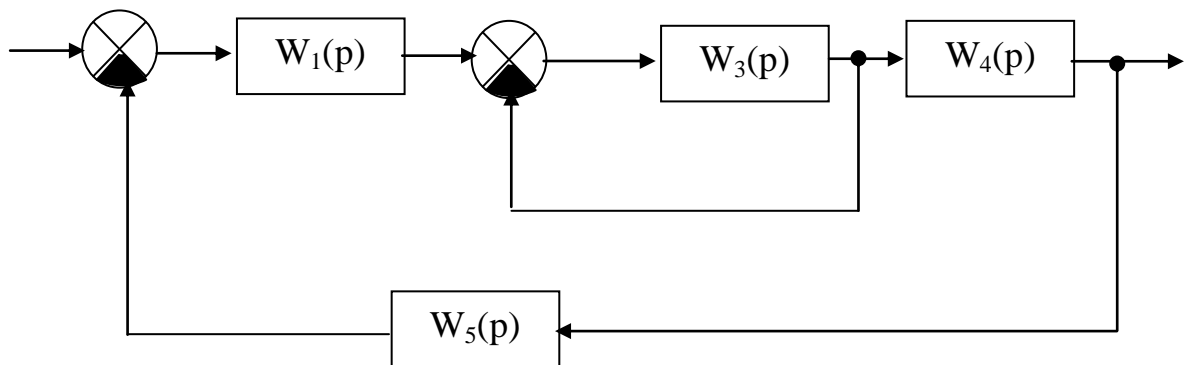


Рисунок 11 - Структурная схема для задания 3.3

$$W_1(p) = 5; \quad W_2(p) = \frac{0,1}{p}; \quad W_3(p) = \frac{0,05}{3p^2 + p + 1} \cdot e^{-2p}; \quad W_4(p) = \frac{0,1}{2p + 1}.$$

#### **4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА**

Отчет должен содержать:

- 4.1.** Форматы функций по преобразованию структурных схем.
- 4.3.** Полученные передаточные характеристики.
- 4.2.** Результаты выполнения заданий для самостоятельной работы.

#### **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

- 5.1.** Какими подклассами могут быть представлены линейные системы с постоянными параметрами в пакете Control System Toolbox?
- 5.2.** Какой подкласс lti систем обозначается как tf объект?
- 5.3.** Опишите процедуру представления передаточной функции как tf-объекта.
- 5.4.** Каким образом задается звено с запаздыванием?
- 5.5.** Укажите назначение функции feedback.
- 5.6.** Какие существуют на операции звеньев с запаздыванием?
- 5.7.** С помощью каких функций можно описать систему, имеющую звено с запаздыванием ?
- 5.8.** Опишите назначение функции connect.
- 5.9.** Опишите назначение функции append.
- 5.10.** Каковы особенности указания трансцендентного звена при описании системы с помощью функции append.
- 5.11.** Как получить передаточную функцию системы по возмущающему воздействию, или в канале управления имеется звено с запаздыванием?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10

**Тема:** Анализ систем автоматического регулирования с использованием возможностей MATLAB

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Цель работы - изучение функций системы MATLAB, позволяющих анализировать САР

### 2. ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ АНАЛИЗА САР. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ lti-МОДЕЛЕЙ

Пакет Control System Toolbox содержит ряд функций, которые позволяют определять динамические параметры систем автоматики: вычислять полюсы и нули; определять собственную частоту и коэффициент демпфирования; вычислять коэффициент передачи; производить сортировку полюсов и нулей системы в порядке убывания; строить частотные характеристики; получать переходные и импульсные характеристики.

В данной лабораторной представлены функции, позволяющие определять динамические параметры, изучаемые в пределах курса «Автоматика».

#### 2.1. Расчет коэффициента передачи

Функция  $k = \text{dcgain}(\text{sys})$  вычисляет коэффициент передачи  $k$  для lti-модели  $\text{sys}$ . С использованием данной функции может быть определен статизм системы, статическая ошибка, величина задающего воздействия.

#### Задание 1

Структурная схема САР представлена на рисунке 1.

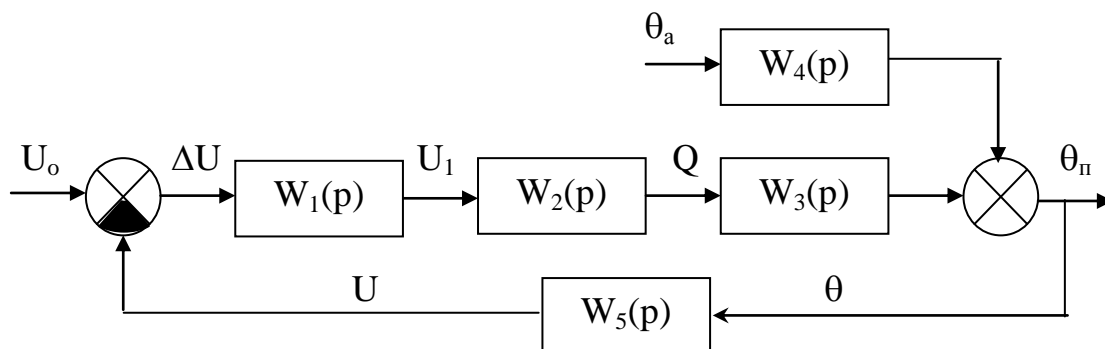


Рисунок 1 - Структурная схема САР

Передаточные функции звеньев САР:

$$W_1(p) = k_1 = 7;$$

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2 p + 1}, \quad k_2 = 0.3, \quad T_2 = 25;$$

$$W_3(p) = \frac{k_3}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1}, \quad k_3 = 11, \quad T_3^2 = 111, \quad T_4 = 75;$$

$$W_4(p) = \frac{k_4}{T_3^2 p^2 + T_4 p + 1}, \quad k_4 = 2, \quad \theta_a = -40, \quad \theta_n = 20;$$

$$W_5(p) = k_5 = 0.05.$$

**Необходимо:**

- определить статизм системы по возмущающему воздействию;
- определить статическую ошибку по возмущающему воздействию;
- определить величину  $U_0$ .

**Решение:**

Зададим передаточные функции элементов:

```
>> f1 = tf ([7]);
>> f2 = tf ([0.3], [25,1]);
>> f3 = tf ([11], [111, 75, 1]);
>> f4 = tf ([2], [111, 75, 1]);
>> f5 = tf ([0.05]);
```

Найдем передаточные функции САР по управляющему WU и возмущающему WV воздействиям:

```
>> WU = f1 * f2 * f3 / (1 + f1 * f2 * f3 * f5).
>> WV = f4 / (1 + f1 * f2 * f3 * f5).
```

Определим статизм системы по возмущающему воздействию:

```
>> kv = dcgain (WV).
```

Статическая ошибка определится как:

```
>> D = kv * -40.
```

Коэффициент передачи САР по каналу управления:

```
>> ku = dcgain (WU)
```

Определим величину задающего воздействия:

```
>> UO = 20/ku
```



## 2.2. Построение частотных характеристик

### 2.2.1. Логарифмические частотные характеристики

*Логарифмические* частотные характеристики применяются при анализе таких свойств систем, как запас устойчивости по фазе и амплитуде, коэффициент передачи, ширина полосы пропускания, реакция системы на возмущение. Логарифмические частотные характеристики называют еще диаграммами Бode, поэтому команды и функции, используемые для их построения, носят аналогичное название.

#### *Формат команды*

**bode (sys)**

**bode (sys,w)**

Команда **bode(sys)** строит на экране графики логарифмических частотных характеристик для lti-моделей **sys**. Диапазон частот определяется автоматически.

Команда **bode(sys,w)** строит логарифмические частотные характеристики в заданном диапазоне частот. Этот диапазон должен быть задан массивом ячеек **w = (w<sub>min</sub>, w<sub>max</sub>)**.

#### *Задание 2*

Построить логарифмические частотные характеристики для непрерывной lti-модели с одним входом и одним выходом.

```
>> h = tf ([5, 2, 0.5], [7, 11, 5, 1, 0])
>> bode (h).
```

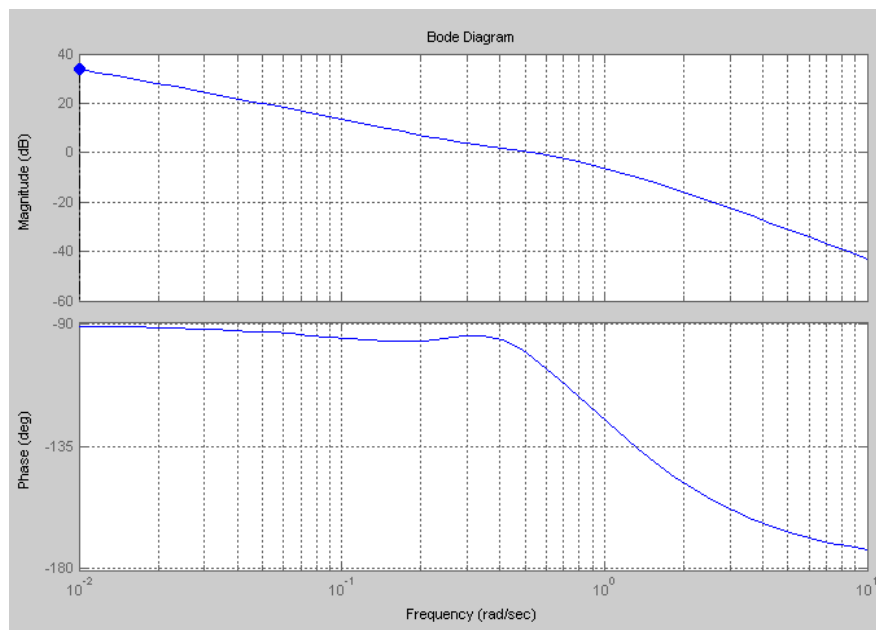


Рисунок 2 - Результат построения логарифмических характеристик

### 2.2.2. Частотные характеристики

Функция **freqresp(sys,w)** рассчитывает частотные характеристики lti-модели **sys** для частот, определяемых вектором **w** (частоты  $\omega$ ). Частоты должны быть заданы в радианах в секунду.

#### *Задание 3*

Рассчитать частотную характеристику для lti-модели с передаточной функцией **p** на частотах  $\omega = [0: 0.1: 5]$ :

```
>> p = tf ([3], [0.5, 1, 1]);
>> w = [0:0.1:5];
>> h = freqresp (p, w);
```

Имея значения частоты  $\omega$ , полученные величины действительной и мнимой части, достаточно легко построить АФЧХ.

### 2.1.1. Построение годографа Найквиста

В исследовании САР достаточно часто используется частотный критерий Найквиста.

Группа команд и функций **nyquist** позволяет рассчитать и построить годограф Найквиста таким образом, чтобы оценить его расположение относительно точки  $(-1, j0)$ .

#### *Формат команды*

```
nyquist (sys)
nyquist (sys,w)
nyquist (sys1, sys2, ..., sysN)
```

Команда **nyquist (sys)** строит на экране график годографа Найквиста для модели **sys**. Диапазон частот определяется автоматически.

Команда **nyquist (sys,w)** строит годограф Найквиста в заданном диапазоне частот. Этот диапазон должен быть задан вектором **w**.

Команда **nyquist (sys1, sys2, ..., sysN)** позволяет построить годограф Найквиста для нескольких lti-моделей на одном графике.

#### *Задание 4*

Для САР, структурная схема которой приведена на рисунке 1, исследовать устойчивость по критерию Найквиста.

Найдем передаточную функцию разомкнутой САР:

```
>> wраз = f1 * f2 * f3 * f5;
```

Построим годограф Найквиста:

```
>> nyquist (wраз)
```

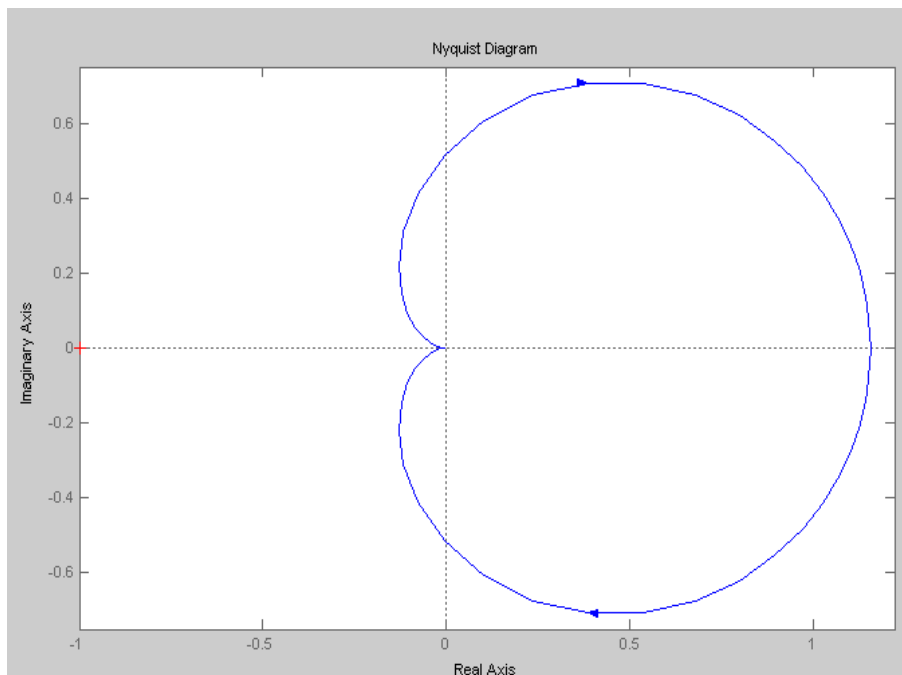


Рисунок 3 - Результат выполнения команды **nyquist (wraz)**

Верхняя часть графика построена при изменении  $\omega$  от  $-\infty$  до  $0$ ; нижняя – при изменении  $\omega$  от  $0$  до  $\infty$ .

Используя возможности редактора свойств графиков, можно оставить только требуемую часть графика, изменить границы отображения рисунка, отредактировать надписи осей, обозначить конкретные точки, по которым построен годограф, с отражением частоты, действительной и мнимой части (рисунок 4):

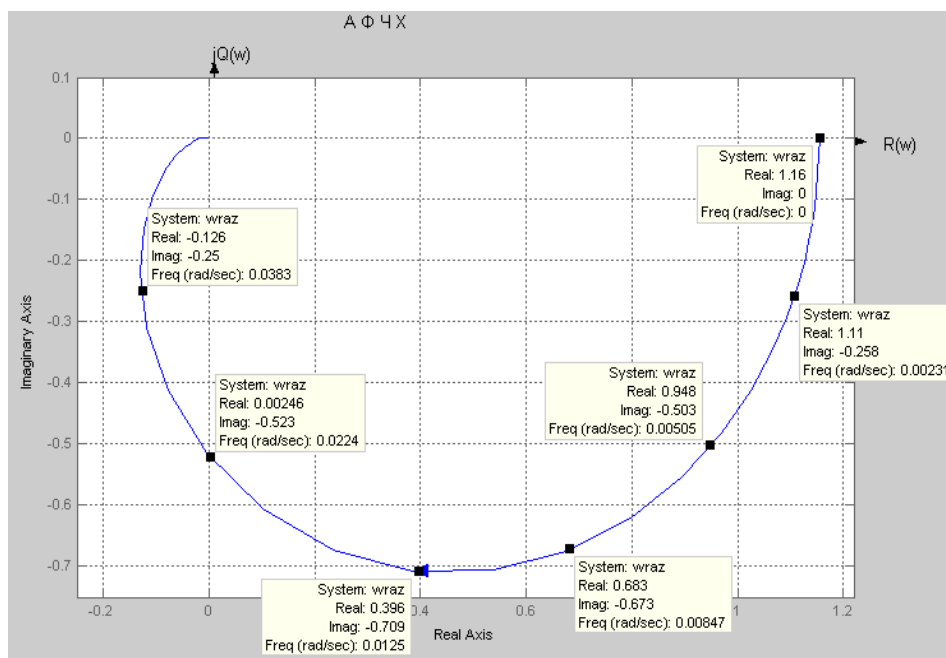


Рисунок 4 - Пример оформления годографа Найквиста с использованием возможностей редактора свойств графиков

С использованием команды **nyquist** достаточно просто решается исследование САР с запаздыванием.

### Задание 5

Добавим в канал управления САР, изображенной на рисунке 1, звено запаздывания:  $W_6(p) = e^{-100p}$ .

Тогда передаточная функция разомкнутой САР с запаздыванием определится как:

```
>> f6 = tf ([1], 'td', 100);
>> wrazz = wrasz * f6
```

Построим на одном графике годограф Найквиста для САР с запаздыванием и без запаздывания.

```
>> nyquist (wrasz, wrazz)
```

После удаления верхнего графика и изменения границ графика АФЧХ предельной САР ( $\tau = 0$ ) и САР с запаздыванием будут иметь следующий вид: (рисунок 5):

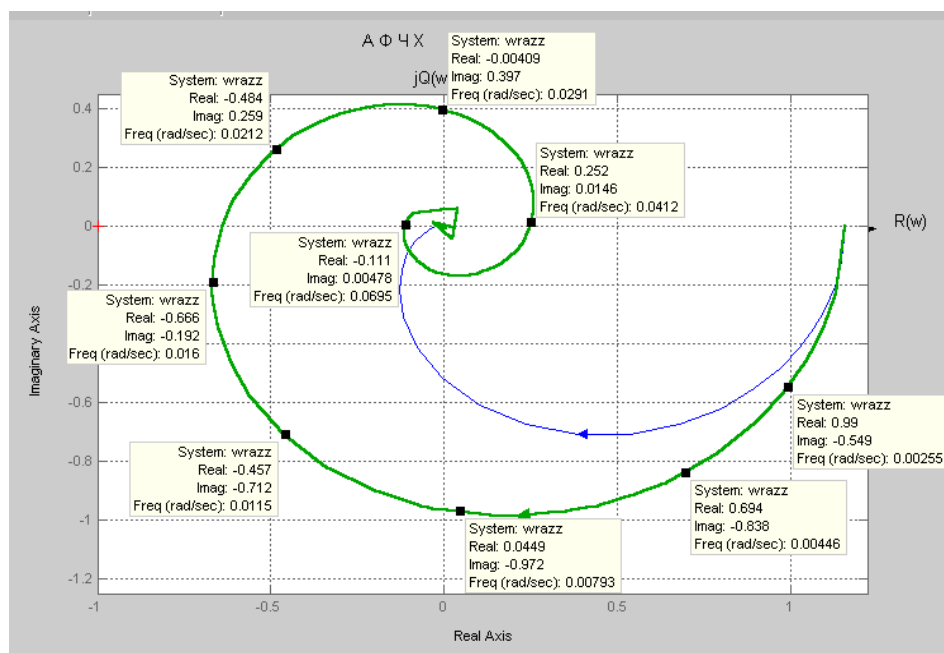


Рисунок 5 - Результаты построения годографа Найквиста для предельной САР и САР с запаздыванием

## 2.2.4. Построение переходной функции, моделирование при произвольных входных воздействиях

### Построение переходных функций

Для построения переходной функции САР при единичном ступенчатом воздействии и нулевых начальных условиях используют команды и функции **step**.

### Формат команды

**step (sys)**

**step (sys, t)**

**step (sys1, sys2, ..., sys N)**

Команда **step (sys)** строит график переходной функции для lti-модели **sys**. Модель может быть непрерывной и дискретной, одномерной и многомерной. Для многомерной модели строится набор переходных функций по каждому каналу входа-выхода. Продолжительность моделирования определяется автоматически так, чтобы отобразить основные особенности переходных процессов.

Команда **step (sys, t)** позволяет явно указать продолжительность моделирования в виде момента окончания **t = Tfinal** в секундах или в виде вектора **t = 0:dt:Tfinal**. Для непрерывных моделей значение **dt** должно быть достаточно малым, чтобы учесть наиболее быстрые изменения переходного процесса.

Команда **step (sys1, sys2, ..., sys N)** позволяет на одном графике построить переходные функции для нескольких lti-моделей.

### Задание 6

Построим переходные функции для САР (рисунок 1) по каналу управления и возмущающему воздействию:

**>> step (wu, wv)**

Результат построения приведен на рисунке 6.

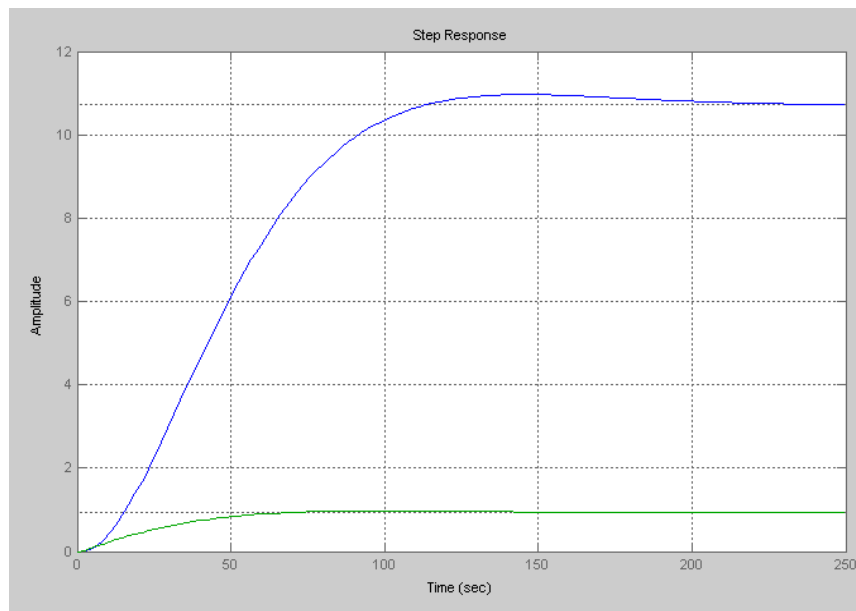


Рисунок 6 - Переходные характеристики САР по каналу управления и по возмущению

Воспользовавшись контекстным меню (щелкнуть правой кнопкой мыши на изображении графиков), можно получить показатели качества переходного процесса. Так, сделав активным в контекстном меню поле **Charac-**

*teristics* и отметив в выпадающем меню поле **Peak Response** (максимум переходного процесса) и **Setting Time** (время переходного процесса) (рисунок 7), получим на переходной характеристике максимальное значение выходной величины и время регулирования.

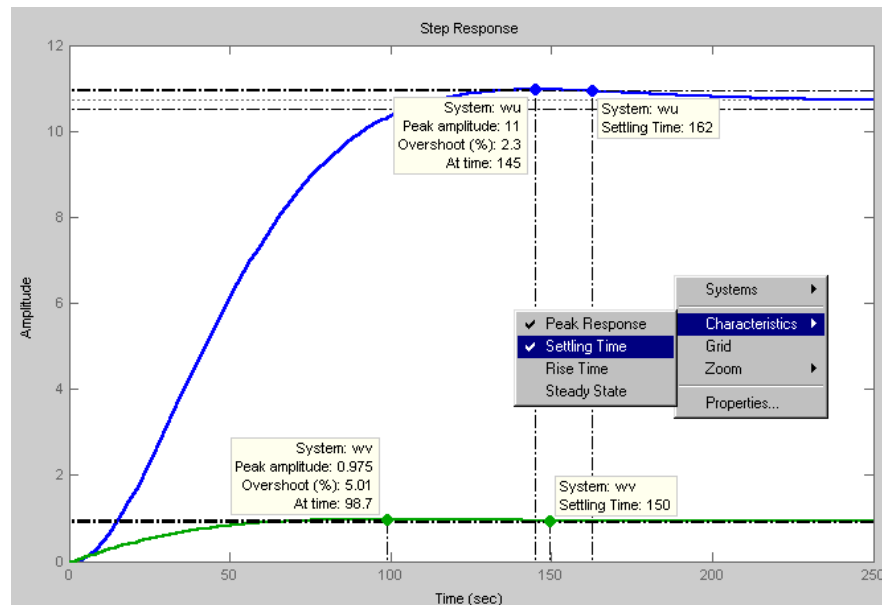


Рисунок 7 - Определение показателей качества переходного процесса

**Примечание.** Время регулирования определяется по попаданию выходной величины в «трубку» 2% относительно от установившегося значения.

Чтобы изменить величину этого интервала (например на 5%) необходимо в контекстном меню щелкнуть левой кнопкой мыши на опции **Properties...**; в появившемся окне редактора **Property Editor: Step Response** сделать активным меню **Characteristics** и в поле **Show setting time within** установить требуемую величину % (рисунок 8).

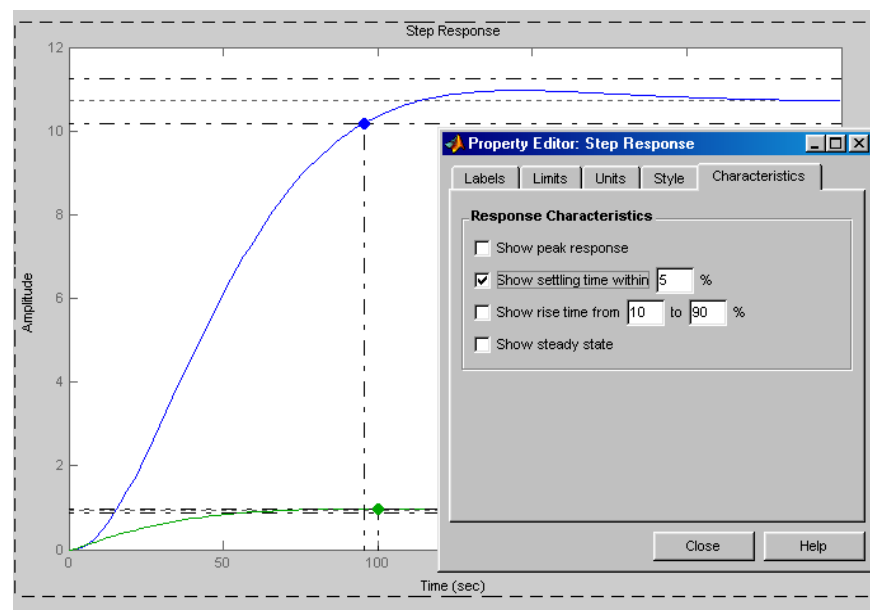


Рисунок 8 - Изменение настроек для определения показателей качества  
Моделирование при произвольных входных воздействиях

При исследовании систем управления бывает необходимо знать переходную характеристику при произвольно изменяющихся входных воздействиях. Для этих целей в пакете Control System используют команды и функции **lsim**.

### *Формат команды*

**lsim (sys, u, t)**

**lsim (sys1, sys2, ..., sysN, u, t)**

Команда **lsim (sys, u, t)** строит графики процессов для lti-моделей **sys** при входных воздействиях, заданных векторами **t, u**. Вектор **t = 0:dt:Tfinal** задает интервал моделирования. **U** для многовходовой системы является матрицей, для одновходовой – вектором, в котором задается значение входного сигнала в момент времени **t(i)**.

Команда **lsim (sys1, sys2, ..., sysN, u, t)** позволяет на одном графике построить процессы для нескольких lti-моделей при одних и тех же значениях векторов **t, u**.

### *Задание 7*

Возмущающее воздействие в течение 15 секунд каждую секунду принимает следующие значения [0, 2, 5, 7, 11, 3, 0, -5, 7, 12, 12, 8, 10, 12, 12] определить реакцию системы на возмущающее воздействие, если ее передаточная функция по возмущению имеет вид:

$$W_{\text{вв}} = \frac{2p+1}{4p^3+2p^2+3p+1}.$$

```
>> wvv = tf([2, 1], [4, 2, 3, 1]);
```

```
>> t = [0:14];
```

```
>> u = [0, 2, 5, 7, 11, 3, 0, -5, 7, 12, 12, 8, 10, 12, 12];
```

```
>> lsim (wvv, u, t)
```

Результаты построения приведены на рисунке 9.

Из графика видно, что моделирование переходного процесса выполнено только для интервала времени, в течение которого задано изменение возмущающего воздействия. Если есть необходимость в получении переходной характеристики для большего интервала времени, когда уже возмущающее воздействие не изменяется, то необходимо увеличить размер вектора **t** и в вектор **u** добавить соответствующее количество постоянных значений возмущающего воздействия.

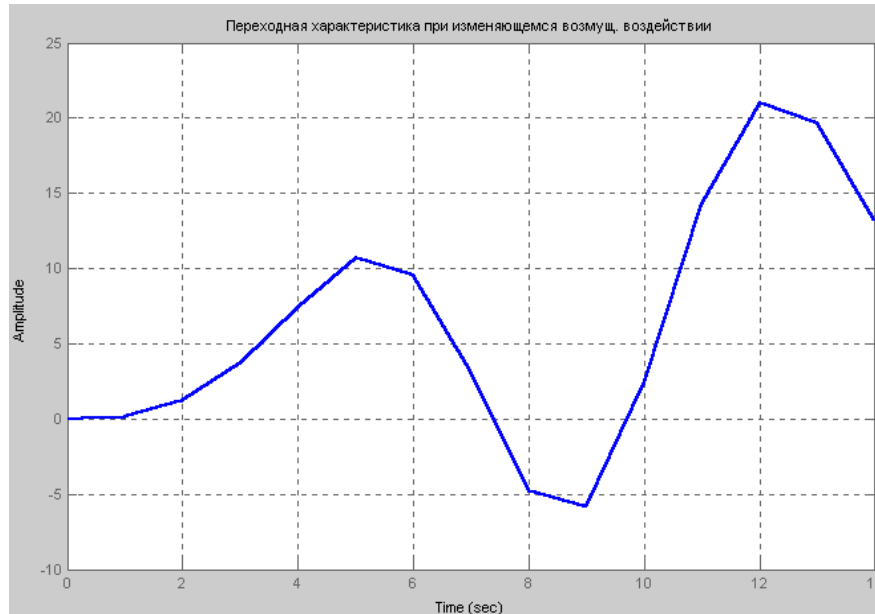


Рисунок 9 - Кривая переходного процесса при изменяющемся возмущающем воздействии

Для получения более плавной характеристики можно произвести аппроксимацию векторов  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{t}$ , получив полином, описывающий зависимость  $\mathbf{u}=\mathbf{f}(\mathbf{t})$ .

Анализ динамических свойств САР удобно проводить с использованием средства просмотра LTI-Viewer. Кратко его возможности изложены в Приложении 1 к лабораторной работе.

### 3. ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Задана САР, структурная схема которой приведена на рисунке 10:

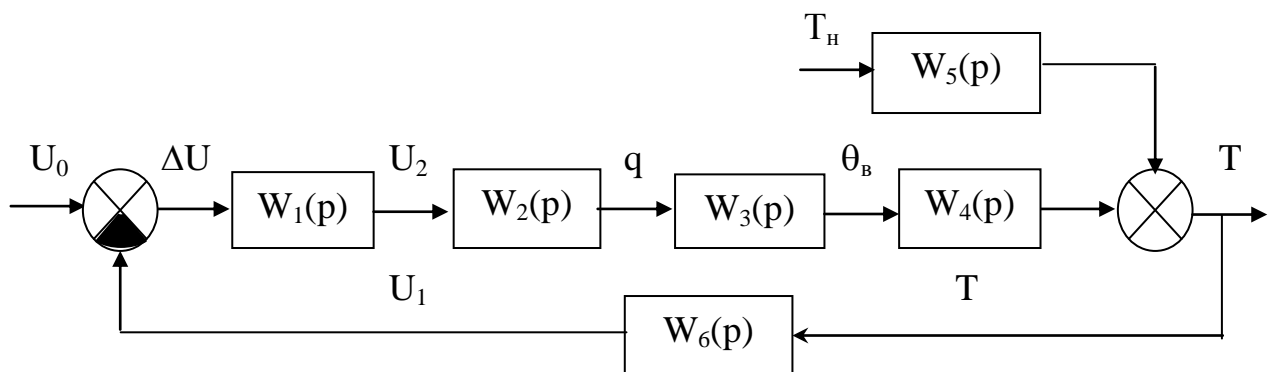


Рисунок 10 - Структурная схема САР

$$W_1(p) = k_1 = 3; \quad W_2(p) = \frac{0.3}{p}; \quad W_3(p) = \frac{k_3}{T_3 p + 1}; \quad k_3 = 0.5, \quad T_3 = 7;$$

$$W_4(p) = \frac{k_4}{T_4^2 p^2 + T_5 p + 1}, \quad k_4 = 12, \quad T_4^2 = 12, \quad T_5 = 26;$$



$$W_5(p) = \frac{k_5}{T_4 p^2 + T_5 p + 1}, \quad k_5 = 3;$$

$$W_6(p) = \frac{k_6}{T_6 p + 1}, \quad k_6 = 0.7, \quad T_6 = 6. \quad T_n = 20, \quad T = 120.$$

### Определить:

- 3.1. Статизм и статическую ошибку системы по возмущению.
- 3.2. Величину  $U_0$ .
- 3.2. Построить переходную характеристику по каналу управления и по каналу возмущения.
- 3.4. Построить годограф Найквиста.
- 3.5. Построить переходную кривую, если возмущающее воздействие = 20.
- 3.6. Построить переходную кривую, если возмущающее воздействие меняется по закону  $\sin(2t)$ .

## 4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

- 4.1. Форматы и назначение изучаемых в лабораторной работе функций и команд.
- 4.2. Исходные данные и результаты выполнения заданий.

## 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

- 5.1. Приведите формат функции, используемой для вычисления коэффициента передачи.
- 5.2. Как можно определить статическую ошибку системы с использованием функций MATLAB?
- 5.3. Приведите формат функции, позволяющей построить логарифмические частотные характеристики.
- 5.4. С помощью какой функции можно построить частотную характеристику САР?
- 5.5. Каким образом на одной координатной плоскости можно построить годограф Найквиста для предельной САР и САР с запаздыванием?
- 5.6. Приведите формат функции, позволяющей построить переходную функцию элемента или САР.
- 5.7. Каким образом по имеющимся графикам переходных функций можно определить время регулирования?
- 5.8. Каким образом можно регулировать интервал заданных значений выходной величины на графике переходной характеристики?
- 5.9. С помощью какой функции может быть получена переходная характеристика при изменяющихся входных воздействиях?
- 5.10. Каким образом задается изменяющееся входное воздействие в функции `lsim`?

### Краткое описание LTI-Viewer

Рассмотрим возможности **LTI-Viewer** на примере.

Пусть дана передаточная функция САР:

$$W(p) = \frac{5 \cdot e^{-5p}}{5,5p^2 + 2p + 3}.$$

Введем ее в рабочей области MATLAB в виде lti-систем:

```
>> W= tf ([5], [5.5, 2, 3], 'td', 2);
```

Для вызова средства просмотра LTI-Viewer введем команду

```
>> ltiview
```

На экране появится пустое окно интерфейса LTI-Viewer (рисунок П1)

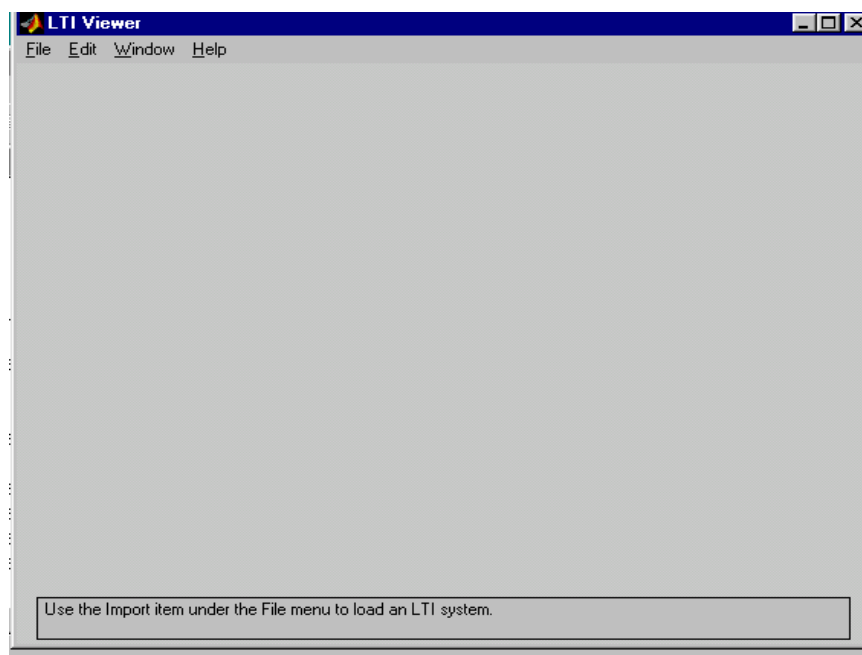


Рисунок П1 - Графический интерфейс LTI-Viewer после его вызова

Чтобы выполнить анализ САР, необходимо из рабочей среды MATLAB произвести загрузку lti-объекта в рабочую среду LTI-Viewer. Для этого в меню LTI необходимо выполнить команды **File**→**Import** (рисунок П2).

В результате будет открыто окно LTI Browser, в котором будут видны lti-объекты, расположенные в рабочем пространстве MATLAB. В данном случае – это передаточная функция W. Необходимо установить на нее курсор и щелкнуть левой кнопкой мыши (рисунок П3).

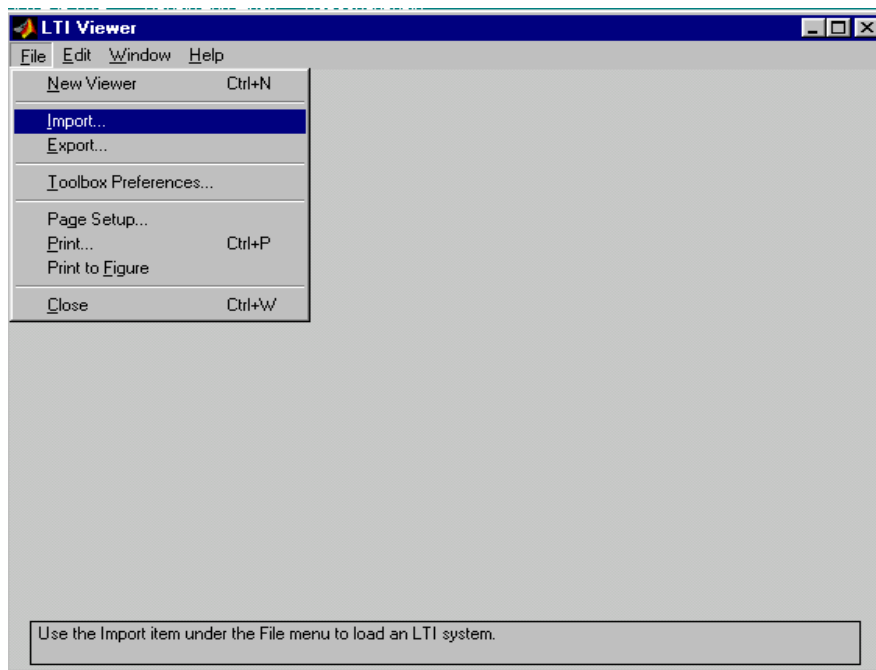


Рисунок П2 - Иллюстрация выполнения команды **File→Import**

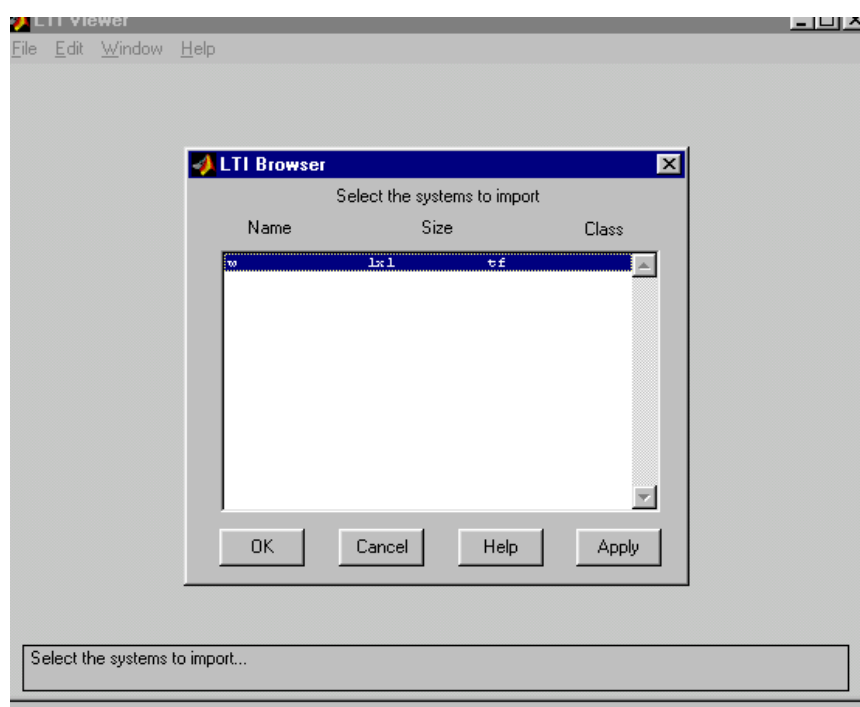


Рисунок П3 - Пояснение процедуры размещения в рабочей среде LTI данных

После нажатия кнопки ОК интерфейса в окне LTI строится график переходной функции САР (рисунок П4).

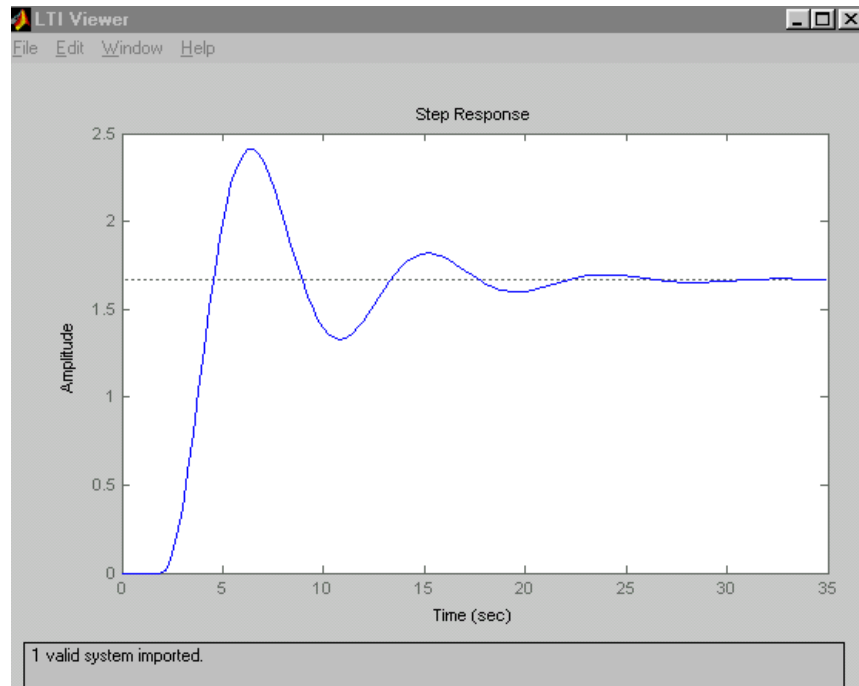


Рисунок П4 - График переходной функции САР

Вызвав контекстное меню, можно указать, какую характеристику системы необходимо построить (рисунок П5):

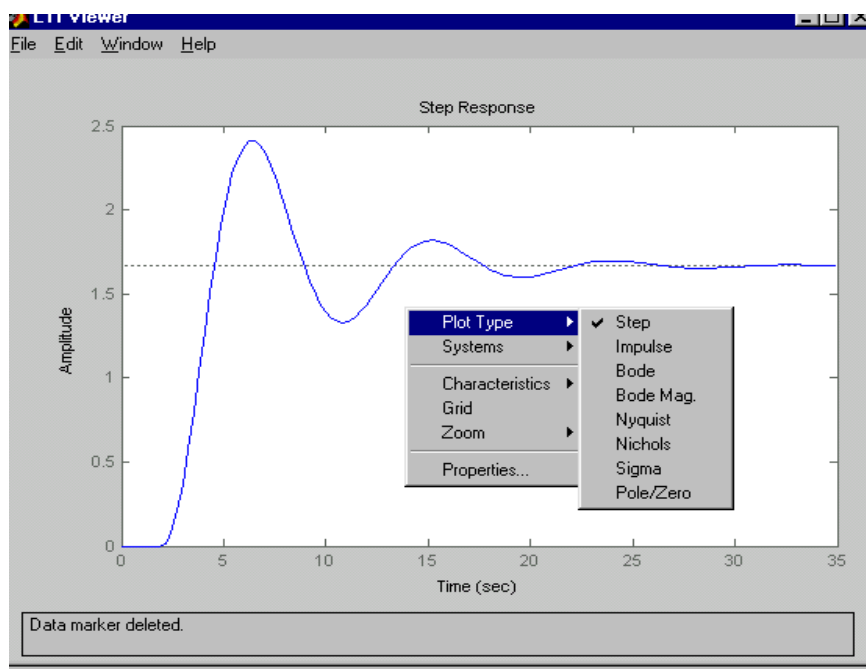


Рисунок П5 - Использование контекстного меню для построения различных графиков

Если необходимо одновременно в одном окне интерфейса построить различные кривые, то необходимо выполнить следующие команды в меню интерфейса: **Edit**→**Plot Configurations...** (рисунок П6):

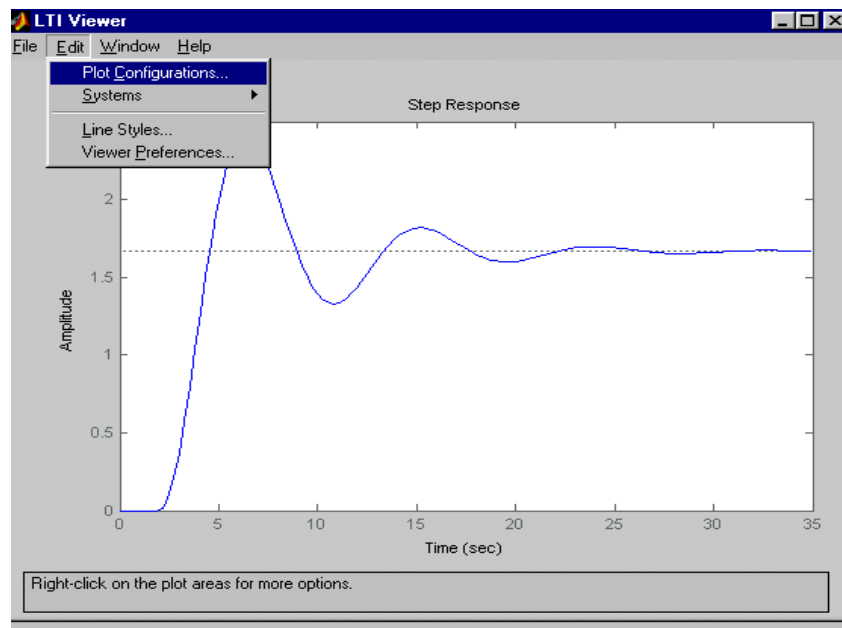


Рисунок П6 - Выбор конфигурации построения графиков

После этого появляется окно **Plot Configurations**, в котором можно выбрать шесть типов размещения графиков в окне интерфейса LTI. Выберем 6-й вариант (рисунок П7):

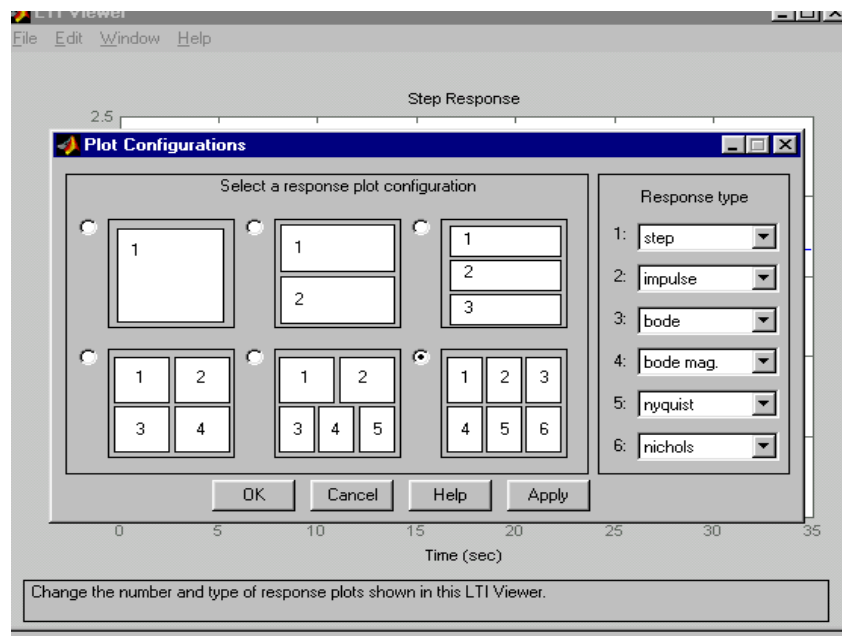


Рисунок П7 - иллюстрация выбора размещения графиков

Щелкнув на кнопке ОК интерфейса, получим все желаемые графики одновременно (рисунок П8):

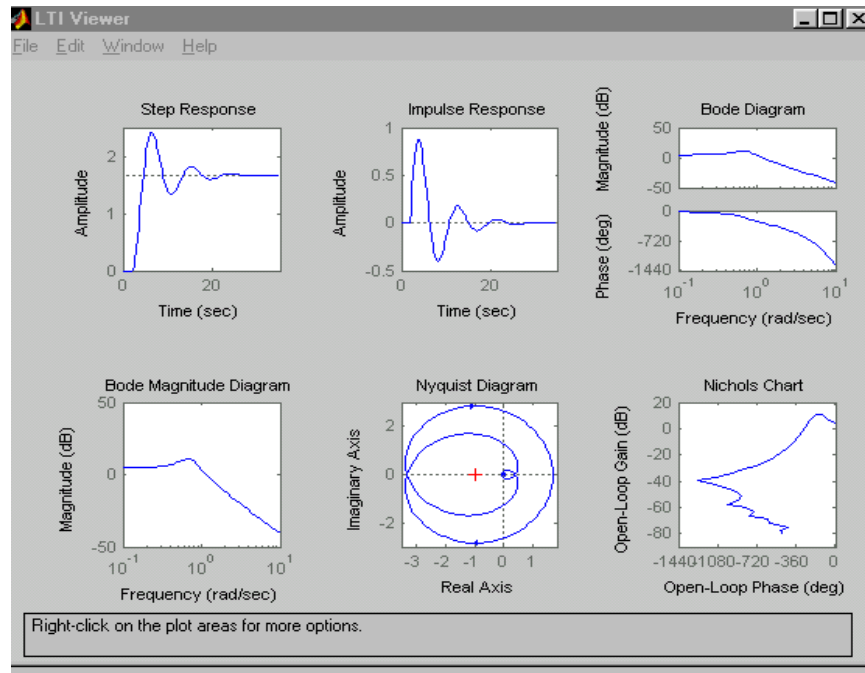


Рисунок П8 - Одновременное размещение различных графиков в окне LTI

LTI-Viewer имеет возможность редактировать графики, определять показатели качества САР по методике, аналогичной изложенной в основном тексте лабораторной работы.